

Düşük sıcaklıklı jeotermal rezervuarlar için boyutsuz rezervuar modelleri

Hülya SARAK*, Abdurrahman SATMAN, Mustafa ONUR

İTÜ Maden Fakültesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, düşük sıcaklıklı jeotermal rezervuarların üretim davranışı analitik olarak modellenmektedir. Modellerde üretim, enjeksiyon ve doğal beslenmenin, düşük sıcaklıklı ve sıvının etken olduğu bir jeotermal rezervuarın basınç veya su seviyesi üzerindeki etkileri göz önüne alınmaktadır. Modellemede rezervuar ve akifer ayrı ayrı tanklar olarak temsil edilmekte ve beslenme kaynağının etkisi incelenmektedir. Model sonuçları sabit debide üretim/tekrar-basma durumunda analitik ifadeler şeklinde verilmekte, debi değişimleri Duhamel ilkesi yaklaşımıyla modellenmektedir. Rezervuar ve akifere ait model parametrelerinin tahmin edilmesinde, doğrusal olmayan ağırlıklı en küçük-kareler parametre yöntemi kullanılmaktadır. İzlanda'daki düşük sıcaklıklı jeotermal sahalardan biri olan Laugarnes jeotermal sahası ile Türkiye'den bir örnek olarak Balçova-Narlidere jeotermal sahasına ait üretim ve su seviyesi verileri kullanılarak modelleme çalışması yapılarak, model sonuçları ile saha verileri karşılaştırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal rezervuar davranışı, doğal beslenme, analitik modeller.

Lumped parameter reservoir models for low-temperature geothermal reservoirs Abstract

In this study, the production behavior of low-temperature geothermal reservoirs is simulated by analytical models. Models consider the effects of production and injection rates and natural recharge on the pressure or water level behavior of a low-temperature, liquid dominated geothermal reservoir. Reservoir and aquifer are represented by different tanks and the effect of recharge source is studied. Tank systems used in the modeling and represent the geothermal system, can be classified as 1 reservoir tank with recharge; 1 reservoir, 1 aquifer with recharge; 1 reservoir, 2 aquifers with recharge; 1 upper reservoir, 1 lower reservoir with recharge; 1 upper reservoir, 1 lower reservoir, 1 aquifer with recharge. The reservoir in which the production/reinjection occurs represents the innermost part of the geothermal system. The aquifer in which neither production nor reinjection occurs, recharges the reservoir. The recharge source represents the outermost part of the geothermal system. Model results for constant production/reinjection flow rates are given in the form of analytical expressions. Variable flow rate case is modeled by Duhamel's principle. By using nonlinear weighted least-squares parameter estimation technique, measured field data are matched to model results, and thus reservoir and aquifer parameters are estimated. Model results are compared with the measured data for Laugarnes geothermal field located in Iceland. As an example from Turkey, Balçova-Narlidere geothermal field is investigated.

Keywords: Geothermal reservoir behavior, natural recharge, analytical models.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hülya SARAK. hulya@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 62 77.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Maden Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Lumped parameter models for low-temperature geothermal reservoirs" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 19.04.2004 tarihinde dergiye ulaşmış, 09.06.2004 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.10.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Jeotermal enerji sıcaklığına bağlı olarak, başta konut ısıtması olmak üzere elektrik üretimi, sera ısıtması, termal turizm-tedavi ve endüstri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Türkiye’de ısıtma amaçlı olarak jeotermal enerjinin kullanıldığı bölgeler arasında Balçova, Afyon, Kırşehir, Simav, Gönen ve Kızılcahamam sayılabilir. Sıcak jeotermal akışkan soğuk kış dönemlerinde rezervuardan üretilerek konutların ısıtılması sağlanmaktadır.

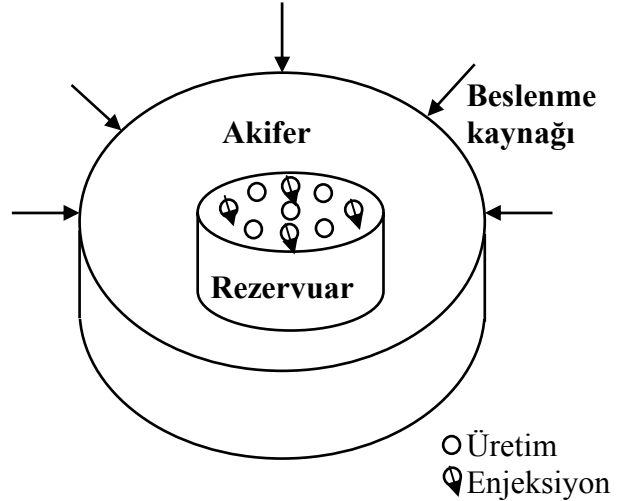
Soğuk kış döneminde rezervuardan yapılan akışkan üretimine bağlı olarak rezervuar basıncı ve su seviyesi düşmekte, sıcak dönemde üretimin azaltılması veya durdurulması durumunda ise, doğal beslenmenin etkisiyle, rezervuar basıncı ve su seviyesi tekrar yükselmektedir. Rezervuardan üretilen miktarın beslenmeyle karşılanması durumunda jeotermal sistem yenilenebilir bir sistem olarak çalışmaktadır. Karşılanmaması durumunda ise tükenebilir jeotermal sistem gündeme gelmektedir.

Jeotermal rezervuar modellemesinin başlıca amacı, uzun dönem jeotermal rezervuar potansiyelinin doğru ve gerçekçi olarak tahmin edilmesidir. Bu amaçla, özellikle son kırk yıl içinde jeotermal rezervuarların davranışlarını modelleyen birçok yöntem geliştirilmiştir (Whiting ve Ramey, 1969; Grant, 1977; Castanier vd., 1980; Brigham ve Ramey, 1981; Olsen, 1984; Axelsson 1989; Alkan ve Satman, 1990; Axelsson ve Gunnlaugsson, 2000). Bu yöntemler, karmaşıklıkları ve maliyetleri açısından farklılık göstermektedirler. Uygun yöntemin (modelin) seçiminde, eldeki verilerin güvenilirliği, miktarı ve ayrıca modellenmenin amacı göz önünde bulundurulmalıdır.

Boyutsuz rezervuar modellemesi

Boyutsuz rezervuar modellemesinde, rezervuar bir bütün olarak alınır. Rezervuara giren ve rezervuardan çıkanlar gözetilerek ve ayrıca akışkan-kayaç özellikleri kullanılarak, zamana veya rezervuardan yapılan üretime göre rezervuar basıncının davranışını belirlemeyi amaçlayan bir modelleme şeklidir. Bu yöntemin başlıca avantajları arasında kullanımının basitliği ve büyük bilgisayar kapasitelerine gereksinim duyulmaması sayılabilir.

Bu bölümde sunulan ve kullanılan modellerde, jeotermal sistem üç ayrı bileşen ile temsil edilmektedir. Bunlar; üretim ve tekrar-basmanın (re-enjeksiyonun) gerçekleştiği rezervuar, rezervuarı besleyen akifer ve akiferin beslediği beslenme kaynağıdır (Şekil 1).

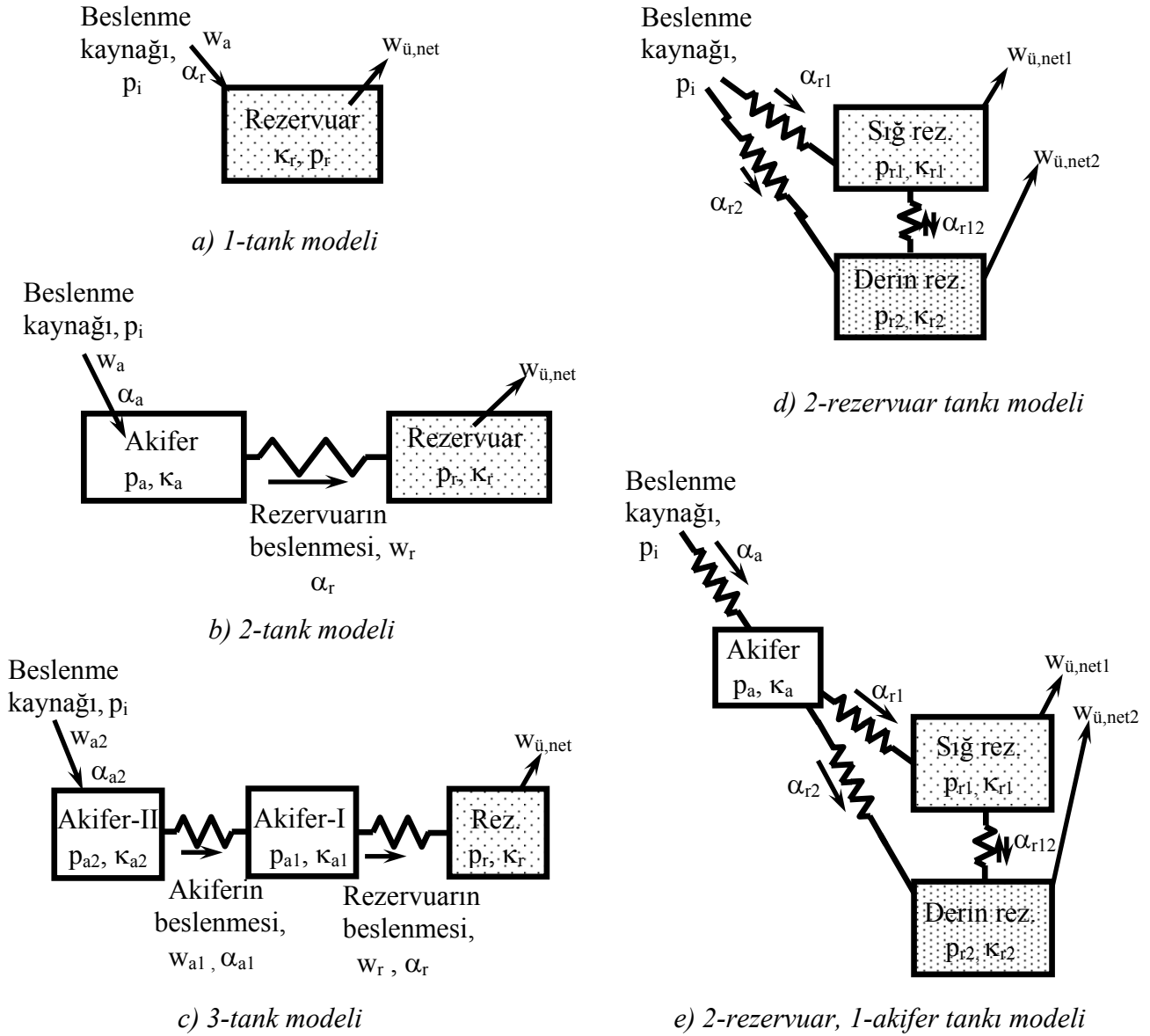


Şekil 1. Jeotermal sistemin bileşenleri

Modellerde, rezervuar ve akifer birer tank olarak düşünülmekte ve herbir tank için ortalama özellikler kullanılmaktadır. Akiferin dış sınırının akışa kapalı olması ve sabit basınçlı bir dış sınırdan beslenmesi (bir başka ifade ile jeotermal sistemin beslenmesi) durumları incelenmektedir.

Şekil 2’de gösterilen 5 farklı jeotermal sistem, sadece bilinen basit kütle denge denklemleri kullanılarak modellenmektedir. Kullanılan jeotermal sistemler aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır:

- 1 rezervuar tankı ve beslenme kaynağı (1 Tank Modeli)
- 1 rezervuar - 1 akifer ve beslenme kaynağı (2 Tank Modeli)
- 1 rezervuar - 2 akifer ve beslenme kaynağı (3 Tank Modeli)
- 1 sığ - 1 derin rezervuar ve beslenme kaynağı (Akifersiz 2 Rezervuar Tankı Modeli)
- 1 sığ - 1 derin rezervuar - 1 akifer ve beslenme kaynağı (Akiferli 2 Rezervuar Tankı Modeli)



Şekil 2. Modellemede kullanılan tank sistemleri

Sıvının etken olduğu jeotermal rezervuarların incelendiği modellerde, üretim süresince izotermal koşulların geçerli olduğu varsayılarak ısı dengesi ihmal edilmektedir.

Modellerde, tanklar arasındaki (akifer-rezervuar veya akifer-akifer) su girişi Schilthuis kararlı akış denklemi ile ifade edilmektedir. Beslenmenin, tanklar ile beslenme kaynağı arasındaki basınç farkı ile orantılı olduğu varsayılmaktadır.

Rezervuar basıncının korunması için tekrar-basmanın da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Enjekte edilen akışkanın sıkıştırılma-

bilirliğinin değişmediği varsayımı yapılırsa, tekrar-basma, W_e , ve üretim, $W_{\dot{u}}$, terimleri *Net Üretim* terimi, $W_{\dot{u},net}$, olarak Denklem 1 ve Denklem 2’de verildiği gibi birleştirilebilmektedir.

$$W_{\dot{u},net} = W_{\dot{u}} - W_e \quad (1)$$

veya kütle debisi olarak,

$$w_{\dot{u},net} = w_{\dot{u}} - w_e \quad (2)$$

şeklinde verilebilir.

1-tank modeli: Bu modellemede kullanılan tank sistemi Şekil 2.a ile gösterilmektedir. Burada rezervuar bir tank olarak düşünülmekte ve rezervuar sabit basınçlı bir beslenme kaynağından beslenmektedir. Rezervuar tankı ile beslenme kaynağı başlangıçta ($t=0$) hidrolik olarak dengededir. Rezervuar tankından yapılan net üretim, $w_{ü,net}$ miktarına bağlı olarak, basıncı sabit olan beslenme kaynağından rezervuara su girişi, w_a gerçekleşmektedir. Sistemden kütle kaybının olmadığı düşünülürse, kütle denge denklemi;

$$W_c = W_i - W_{ü,net} + W_a \quad (3)$$

şeklinde yazılır. Burada; incelenen zaman değeri rezervuardaki kütle, W_c , rezervuardaki ilk kütle, W_i , net üretilen kütle, $W_{ü,net}$, beslenme ile akiferden rezervuara giren kütle, W_a ile gösterilmektedir.

Basınçlı-sıkıştırılmış sistemlerde (confined system) üretim, sıkışmış akışkanın genleşmesi ile gerçekleşmektedir. Sistemin basınçlı-sıkıştırılmış sistem olmasına bağlı olarak, sıvının etken olduğu rezervuarlarda başlangıçta akışkan sıkışmış sudur. Bu durumda rezervuardan üretime başlanması ile birlikte, sıkıştırılabilirliği nedeniyle su genleşecektir. Rezervuar hacmi, V_r , için yerindeki akışkan kütlesi,

$$W_c = V_r \phi_r \rho_r \quad (4)$$

şeklinde verilir. Burada; ϕ_r , rezervuar gözenekliliği ve ρ_r , rezervuar akışkanının yoğunluğudur.

Denklem 4, Denklem 3'de yerleştirilir ve zamana göre türevi alınırsa, izotermal sıkıştırılabilirliğin tanımı kullanılarak;

$$w_a - w_{ü,net} = V_r \phi_r \rho_r c_t \frac{dp_r}{dt} = \kappa_r \frac{dp_r}{dt} \quad (5)$$

elde edilir. Burada; w_a ve $w_{ü,net}$ sırasıyla beslenme ve net üretim debileri, c_t toplam (akış-

kan+formasyon) sıkıştırılabilirliği ve κ_r ise rezervuarın depolama kapasitesi olup, $\kappa_r = V_r \phi_r \rho_r c_t$ şeklinde ifade edilmektedir.

Sistemin dış sınırındaki beslenme kaynağının basıncının sabit olması durumunda su girişi (beslenme) debisi Schilthuis modeli kullanılarak (Schilthuis, 1936);

$$w_a = \alpha_r (p_i - p) \quad (6)$$

şeklinde elde edilir. Burada; p_i , beslenme kaynağının basıncı; p , rezervuar tankının basıncı ve α_r , rezervuarın beslenme sabitidir.

Denklem 5 ve 6 birleştirilir ve elde edilen birinci derece diferansiyel denklem uygun başlangıç koşulu kullanılarak çözülürse, rezervuar basıncının (veya $p = \rho g h$ ilişkisi kullanılarak kuyuyu su seviyesinin) zamana göre ifadesi Denklem 7'deki gibi elde edilir.

$$p_r(t) = p_i - \frac{w_{ü,net}}{\alpha_r} [1 - \exp(-\alpha_r t / \kappa_r)] \quad (7)$$

Elde edilen bu sonuç denklemini, sabit debi ile üretim yapılması durumu için zamanın erken ve geç dönemlerinde incelersek;

a) *Zamanın erken dönemlerinde* ; Denklem 7'deki eksponansiyel terim,

$$\exp(-\alpha_r t / \kappa_r) \approx 1 - \frac{\alpha_r}{\kappa_r} t, \quad t \ll \frac{\kappa_r}{\alpha_r} \text{ için}$$

şeklinde yazılabilir ve Denklem 7 aşağıdaki gibi elde edilir.

$$p_r(t) = p_i - \frac{w_{ü,net}}{\kappa_r} t \quad (8)$$

Denklem 8'den anlaşılabileceği gibi, zamanın erken dönemlerinde rezervuar basıncı zamana bağlı olarak doğrusal olarak azalmaktadır ve rezervuara olan su girişi ihmal edilebilecek seviyededir. Denklem 8 kullanılarak, zamanın erken dö-

nemlerinde rezervuar depolama kapasitesi, κ_r , elde edilebilmektedir. Bir başka deyişle, rezervuar basıncı rezervuar depolama kapasitesinin, κ_r , bir fonksiyonu olup, rezervuarın beslenme sabitinden, α_r , bağımsızdır.

b) *Zamanın geç dönemlerinde* ; Denklem 7'deki ekspanansiyel terim,

$$\exp(-\alpha_r t / \kappa_r) = 0, \quad t > 5 \frac{\kappa_r}{\alpha_r} \text{ için}$$

şeklinde yazılabilir ve Denklem 7 aşağıdaki gibi elde edilir.

$$p_r(t) = p_i - \frac{w_{ü,net}}{\alpha_r} = \text{sabit} \quad (9)$$

Denklem 9'dan anlaşılacağı gibi, zamanın geç dönemlerinde, rezervuardan yapılan net üretim ile rezervuara olan su girişi miktarı dengelenmekte ve rezervuar basıncı sabitlenmektedir. Zamanın geç dönemlerinde, rezervuar basıncı rezervuarın beslenme sabitinin, α_r , bir fonksiyonu olup, rezervuar depolama kapasitesinden, κ_r , bağımsızdır.

2-tank modeli: Şekil 2.b'de gösterilen 2 tank modelinde, jeotermal sistemin 3 ana parçadan oluştuğu düşünülmektedir. Üretim ve tekrar-basmanın yapıldığı 1 rezervuar tankı, rezervuarı besleyen 1 akifer tankı ve akiferi besleyen sabit basınçlı bir beslenme kaynağı bulunmaktadır. Rezervuar tankından yapılan net üretim, $w_{ü,net}$, miktarına bağlı olarak akifer tankından rezervuar tankına su girişi, w_r , gerçekleşmekte ve akifer tankının basıncı düşmektedir. Bu ise, beslenme kaynağından akifer tankına su girişine, w_a , neden olmaktadır. Böylece tüm sistem, rezervuar tankından yapılan üretimden etkilenmektedir.

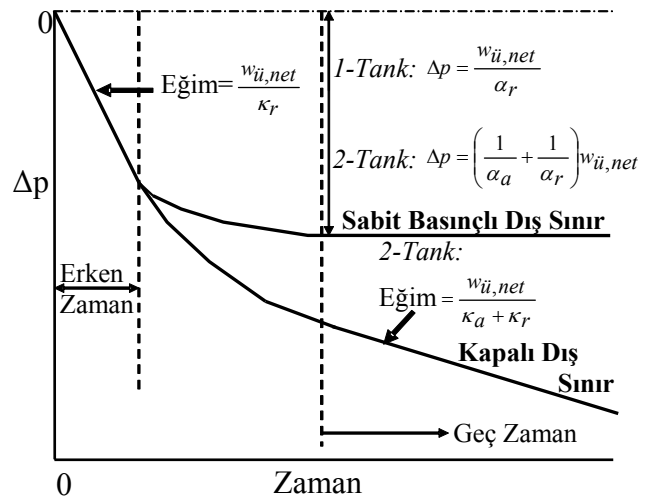
Akifer tankının dış sınırında, sabit basınçlı bir dış sınır (basıncı p_i değerinde sabit kalan bir beslenme kaynağı) olabileceği gibi akışa kapalı bir dış sınır olması da olasıdır. Akifer tankı için uygun dış sınır koşulu kullanılarak elde edilen

analitik çözümler (Sarak, 2003) zamanın erken ve geç dönemlerinde incelenerek, sonuçlar grafiksel olarak Şekil 3'de verilmektedir.

Üretim döneminin erken zamanlarında sabit basınçlı dış sınır ve kapalı dış sınır çözümleri birbirleriyle aynı olup; rezervuar basıncı net üretim debisi, $w_{ü,net}$, ve rezervuarın depolama kapasitesine, κ_r , bağlı olarak zamanla doğrusal olarak azalmaktadır. Belirli bir geçiş zamanından sonra, sabit basınçlı dış sınır çözümü geç zamanlarda rezervuar ve akiferin beslenme sabitlerinin

harmonik ortalamasının $\left(\frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{\alpha_r} \right)$ bir fonksiyonu olarak sabit bir basınç değerine ulaşmakta,

bir başka ifadeyle, rezervuar basıncı zamandan bağımsız olarak sabitlenmektedir. Kapalı dış sınır olması durumunda ise rezervuar basıncı üretim debisi, $w_{ü,net}$, ve sistemin toplam depolama kapasitelerine, $\kappa_a + \kappa_r$, bağlı olarak zamanla doğrusal olarak azalmaya devam etmektedir.



Şekil 3. 2-tank sabit basınçlı dış sınır ve kapalı dış sınır çözümleri

3-tank modeli: 3-tank modelinde (Şekil 2.c), jeotermal sistemin beslenmesi 2 akifer tankından oluşmakta ve en dıştaki akifer tankı ise sabit basınçlı bir kaynaktan beslenmektedir. Rezervuar tankından yapılan net üretim, $w_{ü,net}$, miktarına bağlı olarak, I. akifer tankından rezervuar tankına su girişi gerçekleşmekte ve I. akifer tan-

kının basıncının düşmesi nedeniyle II. akifer tankından I. akifer tankına su girişi olmaktadır. II. akifer tankında basınç düştüğünde ise beslenme kaynağından II. akifer tankına su girişi olmaktadır. Bu nedenle, bu sistemi kararsız akışın hidrolojik benzetmesi olarak düşünmek olasıdır.

Bu modellemede, en dıştaki akifer tankının dış sınırından sabit basınçlı bir kaynaktan beslenmesi veya beslenmemesi durumları için analitik çözümler geliştirilmiş olup, uzunlukları nedeniyle sonuç denklemleri burada sunulmamaktadır.

Yukarıda sözü edilen dış sınır koşulları için sonuç denklemleri incelendiğinde, 1 tank ve 2 tank modellerinde elde edilen erken zaman çözümü (Denklem 8) 3 tank modeli için de geçerlidir. Sabit basınçlı ve akışa kapalı dış sınır için geç zaman çözümleri ise, sırasıyla, Denklem 10 ve Denklem 11'de verilmektedir.

$$p_r(t) = p_i - w_{ü,net} \left[\frac{\alpha_{a1}(\alpha_{a2} + \alpha_r) + \alpha_{a2}\alpha_r}{\alpha_{a1}\alpha_{a2}\alpha_r} \right] \quad (10)$$

$$p_r(t) = p_i - \frac{w_{ü,net}}{(\kappa_{a1} + \kappa_{a2} + \kappa_r)} t - w_{ü,net} \left[\frac{(\kappa_{a1} + \kappa_{a2})^2 \alpha_{a1} + \kappa_{a2}^2 \alpha_r}{\alpha_{a1}\alpha_r(\kappa_{a1} + \kappa_{a2} + \kappa_r)^2} \right] \quad (11)$$

Burada, $p_r(t)$ rezervuar tankının t zamanındaki basıncını, p_i rezervuar tankının ilk basıncını ve $\alpha_{a2}, \alpha_{a1}, \alpha_r$ ve $\kappa_{a2}, \kappa_{a1}, \kappa_r$ ise sırasıyla en dıştaki ve içerdeki akifer ile rezervuarın beslenme sabitlerini ve depolama kapasitelerini göstermektedir.

Akifersiz 2 rezervuar tankı modeli: Jeotermal sistemin, 1 sığ ve 1 derin olmak üzere iki ayrı rezervuar tankından oluştuğu ve rezervuar tanklarının sabit basınçlı bir beslenme kaynağından beslendiği düşünülen akifersiz 2 rezervuar tankı modeli Şekil 2.d'de gösterilmektedir. Sığ ve derin rezervuardan yapılan net üretim, sırasıyla, $w_{ü,net1}$ ve $w_{ü,net2}$, miktarlarına bağlı olarak re-

zervuar tankları arasında da akışkan akışı gerçekleşmektedir. Model için analitik çözümler uzunlukları nedeniyle burada sunulmamakla birlikte erken ve geç zaman çözümleri, sırasıyla, Denklem 12 ve 13'de verilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} p_{r1}(t) &= p_i - \frac{w_{ü,net1}}{\kappa_{r1}} t \\ p_{r2}(t) &= p_i - \frac{w_{ü,net2}}{\kappa_{r2}} t \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} p_{r1}(t) &= p_i - \left[\frac{w_{ü,net1}(\alpha_{r2} + \alpha_{r12}) + w_{ü,net2}\alpha_{r12}}{\alpha_{r1}\alpha_{r2} + \alpha_{r12}(\alpha_{r1} + \alpha_{r2})} \right] t \\ p_{r2}(t) &= p_i - \left[\frac{w_{ü,net1}\alpha_{r12} + w_{ü,net2}(\alpha_{r1} + \alpha_{r12})}{\alpha_{r1}\alpha_{r2} + \alpha_{r12}(\alpha_{r1} + \alpha_{r2})} \right] t \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Burada, $p_{r1}(t)$ ve $p_{r2}(t)$ sırasıyla sığ ve derin rezervuar tanklarının t zamanındaki basınçlarını, p_i rezervuar tanklarının ilk basınçlarını; $\alpha_{r1}, \alpha_{r2}, \alpha_{r12}$ sırasıyla sığ ve derin rezervuarların beslenme sabitleri ile rezervuarlar arasındaki beslenme sabitini; κ_{r1}, κ_{r2} ise sırasıyla sığ ve derin rezervuar tanklarının depolama kapasitelerini göstermektedir.

Akiferli 2 rezervuar tankı modeli: Bu modellemede jeotermal sistemin, 1 sığ ve 1 derin olmak üzere iki ayrı rezervuar tankından oluştuğu ve her iki rezervuar tankının sabit basınçlı bir akifer tankından ve akifer tankının beslenme kaynağından beslendiği düşünülmektedir (Şekil 2e). Burada incelenen durum, akifersiz 2 rezervuar tankı modelindeki beslenme kaynağı ve rezervuarlar arasında bir akifer tankının olması durumunu yansıtmaktadır. Beslenmenin kararsız akışta olması durumu, akifersiz 2 rezervuar tankı modeline göre daha iyi modellenebilmektedir.

Sığ ve derin rezervuarların basınçlarının zamana göre analitik ifadeleri zamanın erken dönemleri için incelendiğinde elde edilen sonuç denklemi Denklem 12 ile aynı olup, hem sığ hem de derin rezervuarın basıncı zamana bağlı olarak doğrusal olarak azalmaktadır.

Geç zaman çözümleri ise Denklem 13'e benzer olup, uzunlukları nedeniyle burada sunulmamaktadır. Çözüm incelendiğinde, zamanın büyük değerlerinde hem sığ hem de derin rezervuardan yapılan net üretim ile rezervuarlara olan su girişi miktarı dengelendiği ve rezervuarların basıncının sabitlendiği anlaşılmaktadır.

Duhamel ilkesi ve optimizasyon yöntemi

Model sonuçları sabit debide üretim/tekrar-basma için geçerli olup, değişken debi ile üretim/tekrar-basma yapılması durumunda Duhamel ilkesi kullanılmaktadır. Rezervuar basıncına Duhamel ilkesi aşağıdaki gibi uygulanmaktadır.

$$p_r(t) = p_i - \int_0^t w_{u,net}(\tau) \Delta p_u'(t - \tau) d\tau \quad (14)$$

Denklem 14'de verilen konvolüsyon integralinin hesaplanmasında yamuk kuralını temel alan bir sayısal integrasyon yöntemi kullanılmaktadır (Thompson ve Reynolds, 1986; Kuchuk ve Avestaran, 1985).

Model parametrelerinin ölçülmüş su seviyesi (veya basınç düşümü) verilerine karşılaştırılarak tahmin edilmesinde, doğrusal olmayan ağırlıklı en-küçük kareler parametre tahmin yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde (Bard, 1974; Onur ve Kuchuk, 2000) aşağıda verilen hedef fonksiyon minimize edilmektedir.

$$J(\vec{\chi}) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^n w_{j,i} [f_j(t_i, \vec{\chi}) - y_j(t_i)]^2 \quad (15)$$

Burada, $J(\vec{\chi})$ hedef fonksiyonunu, M toplam model fonksiyonu sayısını (1, 2 ve 3 tank modelleri için $M=1$ ve akiferli ve akifersiz 2 rezervuar tankı modelleri için $M=2$), n ölçüm sayısını, f model fonksiyonunu ve y ölçüm değerlerini temsil etmektedir. Denklem 15'de, $\vec{\chi}$ tahmin edilecek model parametre vektörü olup, örneğin, akifersiz 2 rezervuar tankı modeli için

$$\vec{\chi} = [\kappa_{r1}, \kappa_{r2}, \alpha_{r1}, \alpha_{r2}, \alpha_{r12}]^T \quad (16)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (burada T vektörün transpozisini temsil etmektedir). Denklem 15'de $w_{j,i}$, herbir ölçüm noktası için pozitif ağırlığı temsil etmekte olup, ölçüm verilerinde normal dağılımlı kabul edilen olası ölçüm hatalarındaki saçılım (varyans) değerinin tersini temsil etmektedir. Ağırlıkların hepsinin bire eşit alındığı durumda Denklem 15'de verilen hedef fonksiyon, standart ağırlıksız en küçük-kareler yönteminde kullanılan hedef fonksiyona indirgenmektedir. Bu çalışmada, Denklem 15'in minimize edilmesinde gradient-bazlı yöntemlerden ve parametre tahmininde çok yaygın olarak kullanılan Levenberg-Marquardt (Garbow vd., 1980) algoritması kullanılmıştır.

Bu tür parametre tahmin yöntemlerinde, çakıştırmada sonunda, model ve ölçüm verileri arasındaki çakışmanın (veya uyumun) iyilik derecesini ve tahmin edilen parametrelerin güvenilirliğini belirlemek amacıyla istatistiksel ölçütler kullanılmaktadır. Tahmin edilen parametrelerin güvenilirliğini belirlemek amacıyla parametreler için standart %95 güvenilirlik aralıkları hesaplanmaktadır (Bard, 1974; Doğru vd., 1977). Dar güvenilirlik aralığı, tahmin edilen söz konusu parametre değerinin güvenilir olarak tahmin edildiğini gösterirken, geniş güvenilirlik aralığı parametre değerinin güvenilirliğini azaltmaktadır. Ayrıca, çakışmanın uyum derecesini niceliksel olarak değerlendirmek amacıyla çakışmaya ait RMS (root mean square errors) değeri hesaplanmaktadır. RMS değeri aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$RMS_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [f_j(t_i, \vec{\chi}_o) - y_j(t_i)]^2} \quad (17)$$

RMS değeri küçüldükçe model ile saha verisi daha iyi çakışma gösterirken, RMS değeri büyüdükçe daha kötü bir çakışma göstermektedir.

Saha uygulamaları

Laugarnes sahası

Güney-Batı İzlanda'da bulunan Laugarnes sahası, sınının etken olduğu bir jeotermal saha olup

sıcaklığı 115-135°C arasındadır. Sahadan yapılan toplam üretim ile sahayı temsil etmek üzere seçilen bir kuyuda yapılan su seviyesi ölçümleri Şekil 4’de gösterilmektedir (Sarak, 2003).

1 tank, 2 tank ve 3 tank modelleri ile saha verilerine karşılaştırma yapılarak model parametreleri tahmin edilmektedir (Tablo 1). Axelsson (1989) aynı saha verilerini karşılaştırmak için sayı-sal modelleme yöntemini kullanarak 3 tank (ka-palı dış sınır) modeline benzer bir modelleme yapmıştır. Tablo 1’de karşılaştırma yapmak amacıyla Axelsson’un elde ettiği modelleme çalışmasının sonuçları da verilmektedir. Axelsson’un elde ettiği model parametreleri, bu çalışma kapsamında geliştirilen 3 tank-kapalı modelden elde edilen model parametreleri ile oldukça iyi bir uyum göstermektedir.

Tablo 1’deki parantez içindeki değerler %95 güvenilirlik aralıklarını göstermektedir. Tablo 1’de verilen modellere ait RMS değerlerinden de anlaşılabileceği gibi 1 tank modeli, diğer modellere göre, saha verileri ile kabul edilebilir bir çakışma göstermemiştir (Şekil 5).

2 tank sabit basınçlı dış sınır (açık) ve kapalı dış sınır (kapalı) modelleri karşılaştırıldığında (Tablo 1’deki RMS değerleri ve güvenilirlik aralıkları); 2 tank-açık modelinin, 2 tank-kapalı modeline göre Laugarnes sahasını daha iyi temsil ettiği anlaşılmaktadır.

3 tank sabit basınçlı (açık) ve kapalı dış sınır (kapalı) modellerine ait RMS değerleri aynıdır (Tablo 1). Ancak, sabit basınçlı dış sınır modelinden elde edilen model parametrelerine ait güvenilirlik aralıkları, kapalı dış sınır modelinden elde edilenlere göre daha geniştir. Bu nedenle Laugarnes sahasını modellemek için 3 tank-kapalı modeli, 3 tank-açık modeline göre daha uygundur.

2 tank-açık ve 3 tank-kapalı modelleri saha verileri ile hemen hemen aynı uyum içindedir, çakışma mükemmel sayılabilecek kadar iyidir (Şekil 5). Her iki modele ait model parametrelerinin güvenilirlik aralıkları incelendiğinde, 3

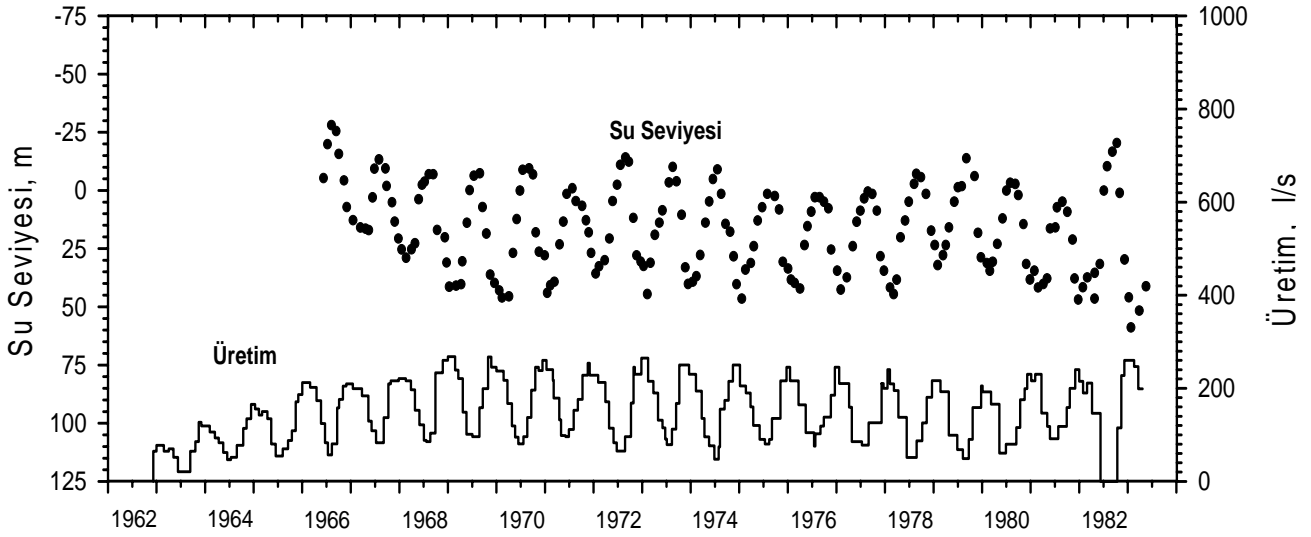
tank-kapalı modelindeki içteki akifer tankının depolama kapasitesine, κ_{a1} , ait güvenilirlik aralığı, bu modelin diğer parametrelerin güvenilirlik aralıklarına göre oldukça geniştir. Bu ise söz konusu parametrenin diğer parametreler göre daha az güvenilir olarak belirlendiğine işaret etmektedir. Bu parametre için en iyi değer 2.6×10^9 ve %95 güvenilirlik aralığı $\pm 2.8 \times 10^9$ olarak belirlenmiştir. Mutlak güvenilirlik aralığı cinsinden, bu parametreye ait gerçek değer $2.6 \times 10^9 \pm 2.8 \times 10^9$ veya 0 ile 5.4×10^9 arasında herhangi bir değer olabileceğini ifade etmektedir. Bu parametreye ait güvenilirlik aralığının oldukça geniş çıkması, veri setinin bu parametreye göre duyarlılığının hemen hemen olmadığına işaret etmektedir. Bu bağlamda 2 tank-açık ve 3 tank-kapalı modellerine ait parametreler için elde edilen güvenilirlik aralıkları ve RMS değerleri göz önünde bulundurulduğunda, 2 tank-açık modelinin 3 tank-kapalı modele göre elde edilen verileri daha iyi temsil ettiğini söylemek yanlış olmayacaktır.

Balçova-Narlıdere sahası

Balçova-Narlıdere jeotermal sahası, İzmir ilinin 10 km batısında ve İzmir-Çeşme karayolunun 1 km kadar güneyindedir. Sahada derinlikleri 48.5 m ile 1100 m arasında değişen kuyulardan üretilen akışkanın sıcaklığı 80°C ile 140°C arasında değişmektedir.

Sahada, 1996’dan günümüze 9 adedi derin ve 12 adedi sığ olmak üzere toplam 21 kuyu bulunmaktadır. Açılmış en derin kuyu (BD-5) 1100 m ve en sığ kuyu (B-9) ise 48.5 m’dir. Derin kuyulardan BD-2, BD-3, BD-4, BD-5, BD-6 ve BD-7 ve sığ kuyulardan B-4, B-5, B-10 ve B-11 sürekli veya aralıklı olarak üretim amaçlı olarak kullanılmaktadır. Genel olarak, kış dönemlerinde derin kuyulardan ve yaz dönemlerinde ise sığ kuyulardan üretim yapılmaktadır.

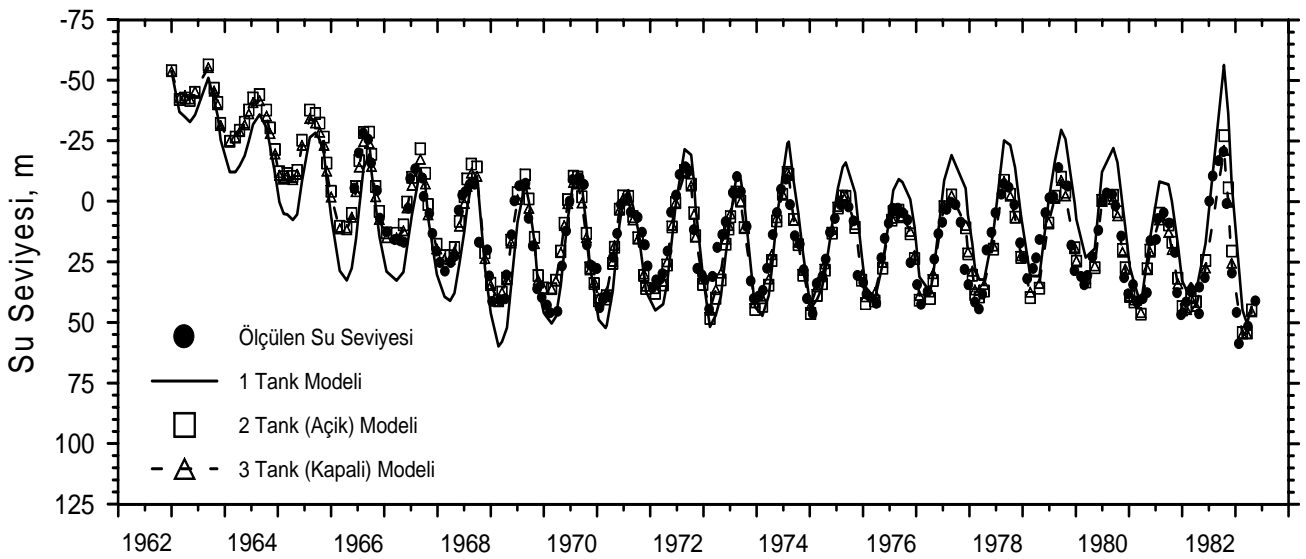
Eylül 2002 tarihine kadar 3 sığ kuyudan, B-2, B-9 ve B-12 tekrar-basma yapılmakta olup, bu tarihten itibaren sığ kuyulardan yapılan tekrar-basma işlemi durdurulup derin kuyulardan (özellikle BD-8’den 24.09.2002 tarihinde) tekrar-basma uygulamasına başlanmıştır.



Şekil 4. Laugarnes sahasının su seviyesi değişimi ve üretim verileri

Tablo 1. Laugarnes sahası optimizasyon sonuçları

	Axelsson (3 Tank-Kapalı)	1 Tank	2 Tank- Kapalı	2 Tank- Açık	3 Tank- Kapalı	3 Tank- Açık
α_{a2} , kg/bar-s	--	--	--	--	--	0.006 (± 8.4)
κ_{a2} , kg/bar	3.64×10^{10}	--	--	--	2.99×10^{10} ($\pm 4.3 \times 10^9$)	3.0×10^{10} ($\pm 5.0 \times 10^9$)
α_{a1} , (α_a , 2-T), kg/bar-s	61.8	--	--	36.81 (± 4.56)	78.8 (± 19.70)	77.78 (± 35.78)
κ_{a1} , (κ_a , 2-T), kg/bar	2.09×10^9	--	2.63×10^{10} ($\pm 2.8 \times 10^9$)	1.05×10^{10} ($\pm 2.7 \times 10^9$)	2.6×10^9 ($\pm 2.8 \times 10^9$)	2.59×10^9 ($\pm 2.9 \times 10^9$)
α_r , kg/bar-s	36.8	20.47 (± 0.55)	26.64 (± 0.93)	30.46 (± 1.83)	33.87 (± 3.08)	33.97 (± 4.28)
κ_r , kg/bar	7.73×10^7	1.0×10^8 ($\pm 1.5 \times 10^7$)	9.99×10^7 ($\pm 1.1 \times 10^7$)	8.94×10^7 ($\pm 1.2 \times 10^7$)	8.25×10^7 ($\pm 1.7 \times 10^7$)	8.23×10^7 ($\pm 1.8 \times 10^7$)
RMS, bar	--	1.140	0.616	0.566	0.525	0.525



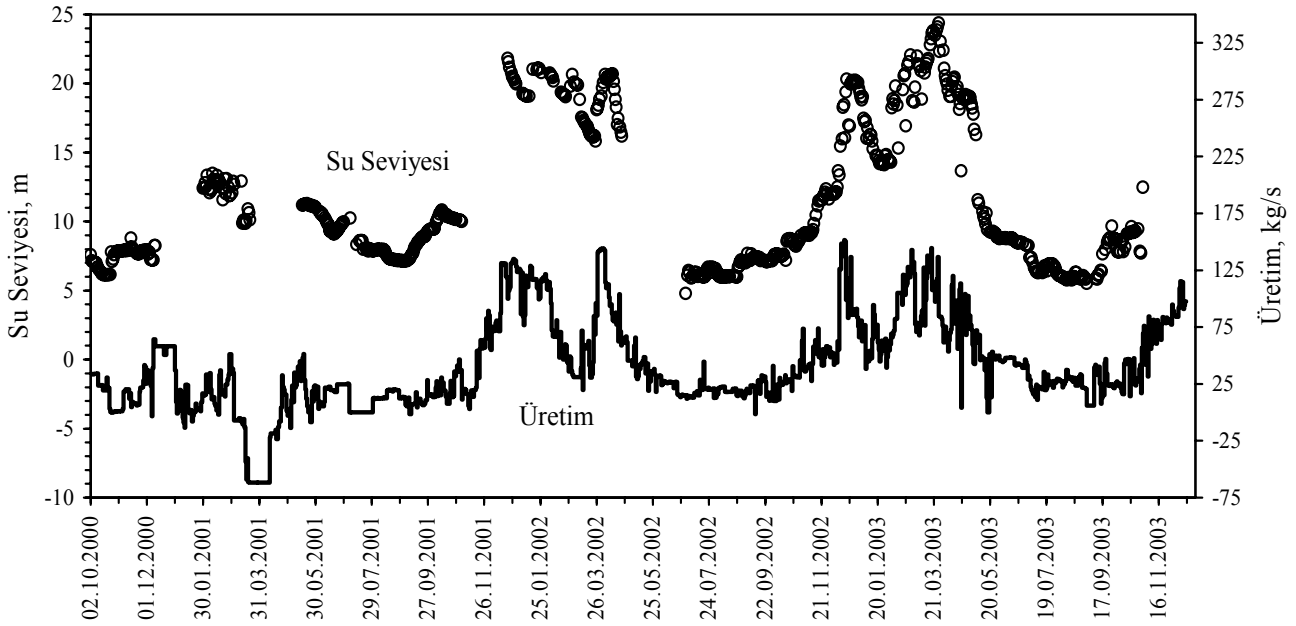
Şekil 5. 1-, 2- ve 3- Tank modellerinin karşılaştırması

Sahadaki kuyulara ait su seviyesi ölçümleri yeterli sıklıkta olmadığı ve uzun süreli olarak ölçülmediği için modelleme açısından sorun olmaktadır. Bu nedenle, en uzun zamanlı su seviyesi ölçümlerinin yapıldığı BD-1 kuyusuna ait seviye verileri kullanılarak modelleme çalışmaları yapılarak, sonuçları tartışılmaktadır.

Konum ve derinlik itibarıyla sığ ve derin kuyular arasında bir yerleşimi olan BD-1 kuyusunun su seviyesi (veya basınç düşümü) hem sığ hem de derin kuyulardan yapılan üretim ve tekrar-basmadan etkilenmektedir (Satman vd., 2002). Sahadan yapılan toplam üretim/tekrar-basma verisi ve BD-1 kuyusuna ait seviye ölçümleri Şekil 6'de sunulmaktadır. BD-8'den tekrar-basmaya başlandığı tarihten itibaren (24.09.2002)

çakıştırma yapılarak 1 tank ve 2 tank-açık modellerinden elde edilen model parametreleri Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2'deki güvenilirlik aralıkları incelendiğinde, 2 tank-açık modeli ile elde edilen akifer tankına ait model parametrelerinin, α_a , κ_a güvenilirlik aralıkları oldukça geniştir. Bu ise elde ki ölçüm verileri için 2 tank-açık modeli kullanıldığında, bu parametrelerin diğer parametreler göre daha az güvenilir olarak belirlendiğini göstermektedir. 2 tank-kapalı, 3 tank-açık ve 3 tank kapalı modelleri ile de modelleme çalışmaları yapılmıştır. Ancak, bu modeller ile elde edilen parametrelerin güvenilirlik aralıkları oldukça geniş elde edildiği için bu modeller ile sahanın temsil edilmesi mümkün değildir ve bu nedenle



Şekil 6. Balçova-Narlidere sahasının su seviyesi değişimi ve üretim verileri

Tablo 2. Balçova-Narlidere sahası 1- ve 2-tank (açık) modeli optimizasyon sonuçları

Model	Model Parametreleri				RMS, bar
	α_a , kg/bar-s	κ_a , kg/bar	α_r , kg/bar-s	κ_r , kg/bar	
1 Tank	--	--	58.78 (± 1.74)	5.0×10^7 ($\pm 4.88 \times 10^6$)	0.307
2 Tank (Açık)	711.89 ($\pm 2.56 \times 10^8$)	1.06×10^{13} ($\pm 8.4 \times 10^{15}$)	58.78 (± 1.86)	5.0×10^7 ($\pm 5.8 \times 10^6$)	0.472

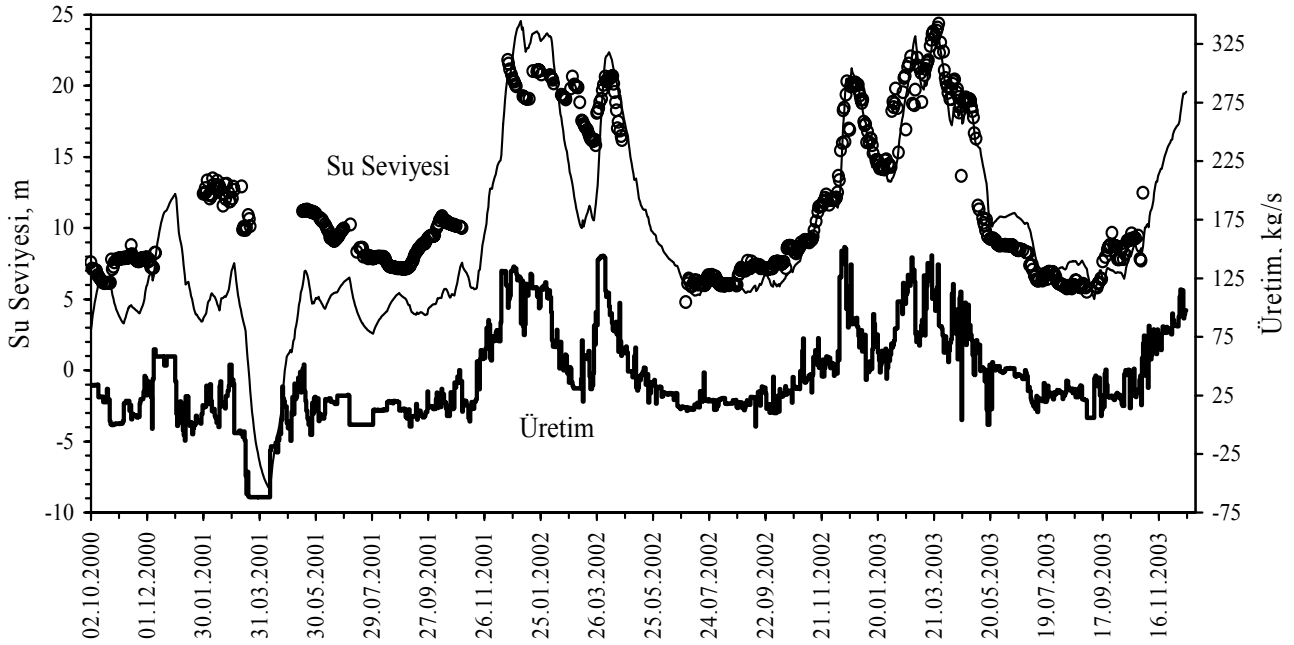
burada tartışılmamaktadır. Diğer taraftan Tablo 2'deki RMS değerleri incelendiğinde, 1 tank modelinden elde edilen RMS değeri 2 tank-açık modelinden elde edilen RMS değerine göre daha küçüktür. Tüm bu nedenlerden dolayı sahayı temsil eden en uygun modelin 1 tank modeli olduğu anlaşılmaktadır. 1 tank modelinin sonuçları saha verileri ile Şekil 7'de karşılaştırılmaktadır. Görüldüğü gibi model sonuçları saha verileri ile 24.09.2002 tarihinden itibaren iyi bir uyum göstermekte olup, bu tarihten önceki dönemlerde iyi bir çakışma elde edilememektedir.

Bu çalışma kapsamında, BD-1&B-12, BD-1 &B-9, BD-6&B-12 ve BD-6&B9 kuyu çiftlerine ait su seviyesi verileri kullanılarak, akiferli ve akifersiz 2 rezervuar tankı modelleri ile de modellemeler yapılmıştır. Model parametreleri-

nin güvenilirlik aralıkları ve çakışmanın uyumunu gösteren RMS değerleri incelendiğinde, BD-1&B-12 en uygun kuyu çifti ve en uygun modelin ise akifersiz 2 rezervuar tankı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Model sonuçları Tablo 3'de gösterilmektedir.

Sonuçlar

Düşük sıcaklıklı jeotermal rezervuarların basınç davranışını (veya kuyuiçi su seviyesi değişimlerini) modellemek üzere kütle denge denklemleri kullanılarak elde edilen 1 tank, 2 tank, 3 tank ve 1 sığ rezervuar, 1 derin rezervuardan oluşan akiferli ve akifersiz 2 rezervuar tankı modelleri tartışılmaktadır. Ağırlıklı en küçük-kareler yöntemi üstüne kurulu Levenberg-Marquardt optimizasyon tekniği kullanılarak, rezervuar ve akifer parametreleri tahmin edilebilmektedir.



Şekil 7. Balçova-Narlidere sahası 1-tank modelini sonuçları

Tablo 3. Balçova-Narlidere sahası akifersiz 2-rezervuar tankı modeli optimizasyon sonuçları

Model Parametreleri					RMS _{sığ} , bar	RMS _{derin} , bar
α_{r1} , kg/bar-s	K_{r1} , kg/bar	α_{r2} , kg/bar-s	K_{r2} , kg/bar	α_{r12} , kg/bar-s		
44.12 (± 2.78)	1.67×10^7 ($\pm 4.7 \times 10^6$)	39.09 (± 2.35)	3.48×10^7 ($\pm 5.1 \times 10^6$)	14.94 (± 2.84)	0.190	0.224

İzlanda'daki Laugarnes sahasına ait üretim ve su seviyesi verileri kullanılarak sahanın su seviyesi davranışı modellenmektedir. Modelleme çalışmasının sonunda sahayı en iyi temsil eden modelin 2 tank-açık modeli olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Model sonuçları ile saha verileri oldukça uyumlu çakışma göstermekte ve çakışma sonunda elde edilen model parametreleri güvenilir olarak tahmin edilmektedir.

Balçova-Narlidere sahasının su seviyesi davranışı 1 tank ve akifersiz 2 rezervuar tankı modelleri kullanılarak modellenmektedir. Ancak, sahada yeterli sıklıkta ve uzun süreli su seviyesi ölçülmediği için, bu çalışmada sunulan modelleme sonuçları niteliksel olarak doğru olup, niceliksel olarak hata içerebilmektedir. Uzun süreli ve sürekli olarak yapılan ölçümler model sonuçlarının belirsizliğini azaltmakta olup, söz konusu saha için yeni verilerin ölçülmesi durumunda modellemenin tekrarlanması sahanın gelecek performansını daha doğru belirleyebilmek için uygun olacaktır.

Teşekkür

Balçova-Narlidere sahasına ait saha verilerinin elde edilmesinde verilen desteklerden dolayı Balçova Jeotermal Ltd. ve Yard. Doç. Dr. Niyazi Aksoy teşekkürle anılır.

Kaynaklar

- Alkan, H., Satman, A., (1990). A new lumped parameter model for geothermal reservoirs in the presence of carbon dioxide, *Geothermics*, **19-5**, 469-479.
- Axelsson, G., (1989). Simulation of pressure response data from geothermal reservoirs by lumped parameter models, *14th Work-shop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, USA, 257-263.
- Axelsson, G., Gunnlaugsson, E., (2000). Long-term monitoring of high- and low-enthalpy fields under exploitation, International Geothermal Association-International Institute for Geothermal Research, Auckland, New Zealand.
- Bard, Y., (1974). *Nonlinear Parameter Estimation*, Academic Press, San Diego.
- Brigham, W.E., Ramey, H.J.Jr., (1981). Material and energy balance in geothermal reservoirs, *Reservoir Engineering Assessment of Geothermal*

- Systems*, Ramey, H.J.Jr. (editor), Petroleum Engineering Department, Stanford University.
- Castanier, L.M., Sanyal, S.K., Brigham, W.E., (1980). A practical analytical model for geothermal reservoir simulation, SPE 8887, *SPE California Regional Meeting*, Los Angeles, Ca, Nisan 9-11.
- Dogru, A.H., Dixon, T.N., Edgar, T.F., (1977). Confidence limits on the parameters and predictions of slightly compressible, single phase reservoirs, *Society of Petroleum Engineering Journal*, Şubat 42-56.
- Garbow, B. S., Hillstrom, K. E., More, J. J., (1980). Subroutine LMDER, Argonne National Laboratory, MINPACK project.
- Grant, M.A., (1977). Approximate calculations based on a simple one phase model of a geothermal reservoir, *New Zealand Journal of Science*, **20**, 19.
- Kuchuk, F.J., Ayestaran, L., (1985). Analysis of simultaneously measured pressure and sandface flow rate in transient testing, *Journal of Petroleum Technology*, Şubat, 323-334.
- Olsen, G., (1984). Depletion modeling of liquid dominated geothermal reservoirs, *Technical Report SGP-TR-80*, Stanford Geo-thermal Program, Stanford University, USA.
- Onur, M., Kuchuk, F. J., (2000). Nonlinear regression analysis of well-test pressure data with uncertain variance, SPE 62918, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Ekim 1-4.
- Sarak, H., Onur, M., Satman, A., (2003). New lumped parameter models for simulation of low-temperature geothermal reservoirs, 28th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, Ocak 27-29.
- Sarak, H., Onur, M., Satman, A., (2003). Applications of lumped parameter models for simulation of low-temperature geothermal reservoirs, 28th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, Ocak 27-29.
- Satman, A, Onur, M., Serpen, U., (2002). İzmir Balçova-Narlidere jeotermal sahasının rezervuar ve üretim performansı projesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü.
- Schilthuis, R.J., (1936). Active oil and reservoir energy, *Transaction American Institute of Mining Engineering*, **118**, 33-52.
- Thompson, L.G., Reynolds, A.C., (1986). Analysis of variable rate well-test pressure data using Duhamel's Principle, *Society of Petroleum Engineering Formation Evaluation*, Ekim, 453-469.
- Whiting, R.L., Ramey, H.J.Jr., (1969). Application of material and energy balances to geothermal steam production, *Journal of Petroleum Technology*, Temmuz, 893-900.